

# 基于 ARM7 的汽车 SASS 和 ABS 分层式协调控制试验研究

夏光<sup>1</sup> 陈无畏<sup>1</sup> 唐希雯<sup>2</sup> 赵林峰<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学, 合肥, 230009

2. 解放军电子工程学院, 合肥, 230037

**摘要:**采用分层协调控制策略,对汽车半主动悬架系统和防抱死制动系统进行了集成控制研究。分别设计了半主动悬架的底层控制器和防抱死制动的底层控制器及二者的上层协调控制器,底层控制器用来执行各子系统控制任务;上层协调控制器以实现整车性能最优为目标,对底层控制器进行相应的调整和修正。试验结果表明:采用分层式协调控制策略可较好地解决两系统间的矛盾,提高汽车在紧急制动过程中的稳定性和安全性,提升整车综合性能。

**关键词:**半主动悬架;防抱死制动;分层协调控制;试验;ARM7

中图分类号:U467.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.04.025

## Experimental Research on Layered Coordinated Control of Vehicle SASS and ABS Based on ARM7

Xia Guang<sup>1</sup> Chen Wuwei<sup>1</sup> Tang Xiwen<sup>2</sup> Zhao Linfeng<sup>1</sup>

1. Hefei University of Technology, Hefei, 230009

2. PLA College of Electronics Engineering, Hefei, 230037

**Abstract:**An integrated control research on SASS and ABS adopting layered coordinated control was carried out. Controllers were designed separately with bottom and upper coordinated controllers. The bottom controllers including SASS and ABS were 2 separate controllers, which were used to carry out different control tasks of subsystems. The upper coordinated controller was used to make the necessary adjustments and amendments of bottom controllers, aiming to improve whole vehicle synthesis performance. The experimental results show that layered coordinated control can coordinate contradiction between SASS and ABS, improve the stabilization and security of vehicle in emergency braking, enhance the overall performance of the vehicle.

**Key words:**semi-active suspension system(SASS); anti-lock braking system(ABS); layered coordinated control; experiment; advanced RISC machines 7(ARM7)

## 0 引言

目前对半主动悬架系统(semi-active suspension system, SASS)<sup>[1-3]</sup>和防抱死制动系统(anti-lock braking system, ABS)<sup>[4-6]</sup>进行单独控制的理论研究较多,而对两系统进行协调控制的研究不多。随着汽车底盘一体化集成控制的发展,对汽车底盘一体化集成控制的研究成为热点。Trächtler<sup>[7]</sup>设计了一个包括 ABS/ASR 和 ASS 等在内的集成控制系统,实现了对汽车垂向、侧向和纵向的有效控制。喻凡等<sup>[8]</sup>提出了 ABS 与主动悬架的联合控制,有效地改善了汽车的动力学特性。对于集成控制策略,通常采用集中式控

制<sup>[9-10]</sup>,其控制器在设计上难度大、周期长,不便于分工协作。分层协调控制策略尽可能充分利用原有的控制模块,具有容错处理的能力,提高了系统的可靠性。

本文采用分层协调控制策略,进行了 SASS 和 ABS 集成控制的研究,分别设计了底层控制器和上层协调控制器。底层控制器包含半主动悬架和防抱死制动两个单独的控制,用以执行各自系统的控制任务;上层协调控制器监控两系统的参数并进行协调分析,及时调整和修正底层控制决策,以提高整车综合性能。

## 1 SASS 和 ABS 协调控制的必要性

汽车实际行驶过程中,SASS 与 ABS 之间是

收稿日期:2011-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075112,51205101)

相互联系、相互影响的。制动工况下,路面在向车辆提供纵向附着力的同时,也向悬架引入了垂向输入干扰,即汽车垂向和纵向的运动是相互联系的;汽车车身俯仰运动可由路面不平引起,也可由制动引起<sup>[11]</sup>。两系统的动力学关系如图 1 所示,图中的轮胎垂直载荷即为悬架反作用力。

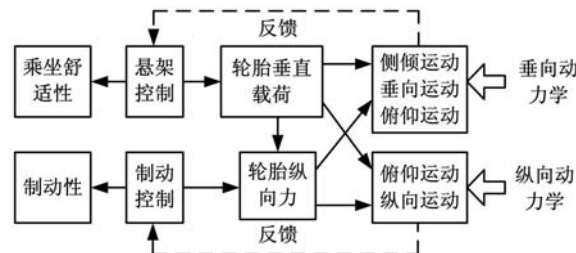


图 1 悬架与制动系统动力学关系图

由图 1 可知,悬架系统在路面输入作用下有 3 种运动形式:垂直于行驶路面的垂直振动、沿汽车前进方向的纵向俯仰运动及侧倾运动。悬架系统的垂直运动会影响地面对轮胎的法向反力;车身沿纵向的前后俯仰运动,将引起前后轮胎垂直载荷的转移;车身沿侧向的侧倾运动,将引起左右轮胎处垂直载荷的变化。这运动都将影响汽车的地面制动力,从而影响汽车制动过程及 ABS 的控制调节。

制动系统在地面制动力和制动器制动力的作用下,汽车的车速、轮速及制动减速度都在不断变化,即处于时变状态。制动时,汽车惯性引起车身俯仰即平常而言的“点头”。“点头”程度与汽车制动减速度有关;制动减速度的存在将产生动载荷的转移,使前后轮胎受力发生改变;汽车制动过程中车速的不断降低,必将导致与车速相关的白噪声路面输入处于时变状态,这都会影响汽车悬架系统的控制与调节过程。

由于悬架系统和制动系统存在相互联系和相互影响,当对两系统通过各自控制器单独进行控制时,对控制参数的调整也将通过结构对另一个子系统产生影响。因此,若不考虑系统间的相互影响,对两子系统实行单独控制,虽然也能取得一定的控制效果,但与实际的控制系统有较大的偏差,同时还可能对其他的耦合子系统产生不利的影

响。由此看来,以往针对汽车悬架和制动系统中某个子系统的单独控制研究,已不能满足人们对车辆整体性能的需求,对汽车悬架和制动系统进行集成化控制研究就显得极为必要。

## 2 分层协调控制系统设计

整个分层协调控制系统如图 2 所示。其中,

$a_x$  为纵向制动减速度,  $a_x = dv/dt$ ,  $v$  为车速,  $\ddot{x}_s$  为悬架垂向加速度,  $\dot{\theta}$  为车身俯仰角速度,  $v_w$  为风速,  $T_s$ 、 $T_b$  分别为悬架和制动系统作用在执行机构上的转矩,  $\Delta T_s$ 、 $\Delta T_b$  分别为协调控制器发送给悬架和制动系统执行机构上的转矩调整量。

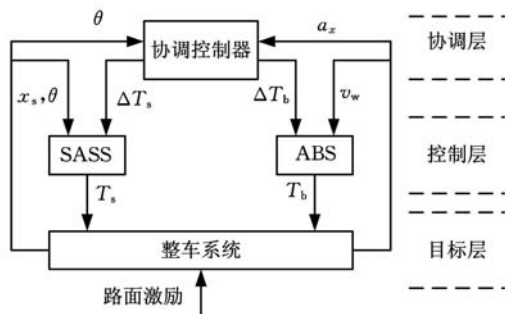


图 2 分层协调控制系统框图

协调控制器通过发出控制调整指令,指导底层控制器 SASS 和 ABS 进行相应的增大、减小及维持阻尼力和制动力的动作。

基于 ARM7 进行了 SASS、ABS 及上层协调控制器软硬件开发。本文以 SASS 的软硬件和基于 CAN 通讯的上层协调控制器开发为例进行介绍。

### 2.1 SASS 硬件系统设计

SASS 采用电磁阀式减振器。电磁阀式减振器是一种新型的阻尼连续可调减振器,它通过先导式比例电磁阀来改变减振器节流通道的开度,进而实现减振器阻尼力的连续调节。电磁阀式减振器的工作原理如图 3 所示,相比于普通双筒式减振器,其增加了一个电磁阀控制的节流通道的开度。这个节流通道的开度包含和上腔相通的中间缸和电磁阀。通过电磁阀对节流通道的开度大小的连续调节来实现减振器阻尼的连续可调。

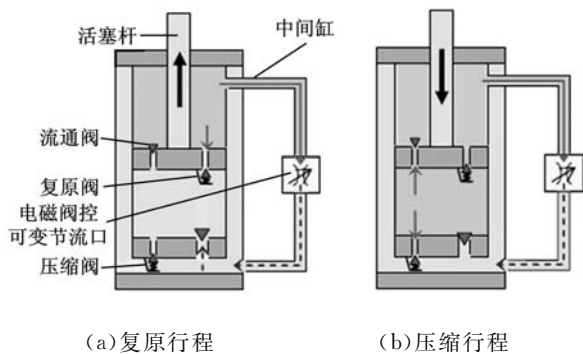


图 3 电磁阀式减振器工作原理图

SASS 硬件设计主要是电子控制单元的硬件电路设计, SASS 硬件结构如图 4 所示,它表明了电磁阀式 SASS 的基本电路结构及工作过程。

硬件电路主要包括单片机和最小系统电路、点火系统供电电路、车身和车轮垂直加速度信号

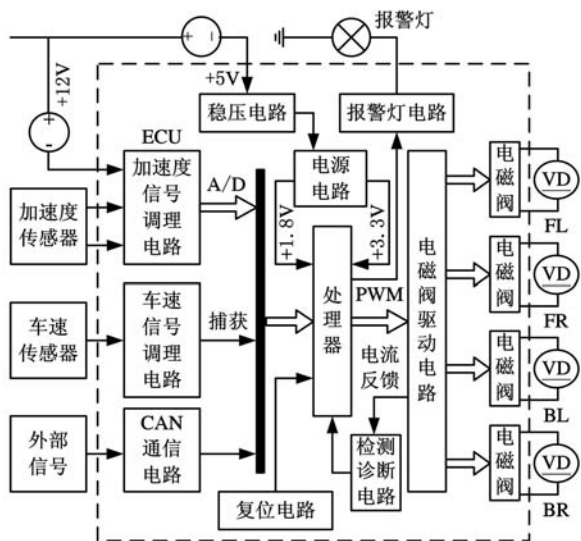


图 4 SASS 硬件电路结构框图

调理电路、车速信号调理电路、电磁阀驱动电路、CAN 通信电路和故障诊断通信电路。CAN 通信电路主要用于与汽车中其他电子控制单元的通信,以达到协调控制的目的。

采用 ARM7 系列的 32 位微控制器 LPC2292 (支持实时仿真和跟踪)为 SASS 控制系统的处理器,LPC2292 的主要功能是完成外来信号的采集、处理,对各种数据进行逻辑分析,计算出车轮车身垂直加速度及车轮车速的绝对值,根据不同驾驶模式进入其相应的处理子程序,输出 PWM 信号控制电磁阀开度以对节流通道的开度进行调节,进而改变减振器阻尼力。

## 2.2 SASS 软件系统设计

采用 skyhook 阻尼控制方法,对电磁阀式 SASS 进行控制。采用 C 语言,在 ADS1.2 开发环境中,基于 LPC2292 进行 SASS 电子控制单元的开发,SASS 主程序流程如图 5 所示。

系统主程序可分为如下几个模块:

(1)初始化设置。系统的初始化主要完成 ARM 启动代码的编写、专用寄存器的定义、全局变量和标志位的定义等。这部分是程序设计的准备工作。

(2)车速计算程序。在主程序的每一个循环中都要确定汽车的速度,车速的计算包括车轮速度的计算。

(3)车辆纵向绝对速度计算程序。车辆纵向加速度的计算采用车速的直接微分法。

(4)车轮车身垂向绝对速度计算程序。车轮车身垂向绝对速度的计算采用直接积分法,它的计算包括车轮车身垂向加速度的计算,对采集到的车轮车身垂向加速度信号进行实用性较强的中

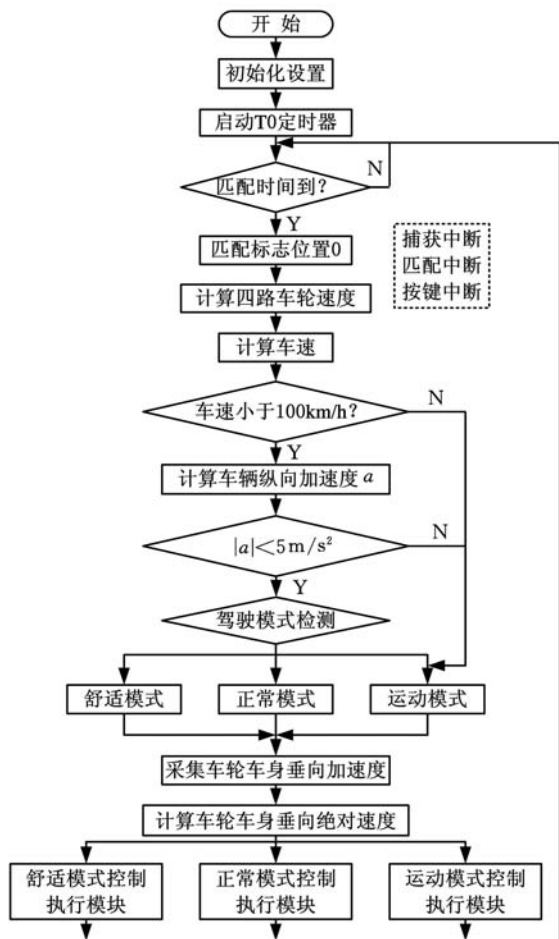


图 5 SASS 主程序流程图

值滤波处理。

(5)正常模式控制执行程序。根据 skyhook 阻尼控制策略,计算出正常模式下的最优阻尼系数,输出相应 PWM 控制信号,控制减振器节流通道的开度的大小,实现对减振器阻尼力的调节。舒适模式和运动模式的控制执行模块与此计算方法类似。

## 2.3 基于 CAN 通信的上层协调控制器设计

上层协调控制器的软硬件设计可参考 SASS 设计过程。在这里主要介绍基于 CAN 通信的上层协调控制器的开发。CAN 通信是上层协调控制器、SASS 及 ABS 等电子控制单元之间数据发送和接收的桥梁与纽带。对于 ARM7 中的 LPC2292 模板来说,需要添加 CAN 驱动程序。对于用户程序来说,不需要关心驱动代码是如何对 CAN 模块进行操作的。用户程序通过调用驱动程序提供的接口,来实现数据的发送和接收,其主程序流程如图 6 所示。

上层协调控制器是一个决策控制器,起到对底层控制器决策和监控的作用。它相当于一个选择开关:当车辆正常行驶时,上层协调控制器起到

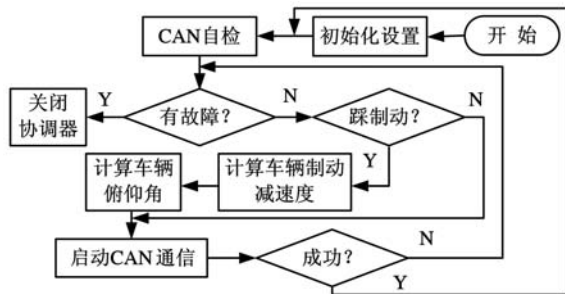


图 6 上层协调控制器主程序流程图



图 7 试验车辆

监控各底层控制器的作用,各传感器信号通过 CAN 总线传输到上层协调控制器,上层协调控制器对主要指标(制动减速度  $a_x$  和俯仰角  $\theta$ )进行监控;发现异常情况(如紧急制动)时,对底层控制器发出决策指令,调整前后轮控制参数(角减速度、滑移率门限)及 SASS 控制参数(减振器控制电流),解决两系统间的矛盾。

选取制动减速度  $a_x$  和车身俯仰角  $\theta$  为上层协调控制器的主要决策指标,则上层协调控制器可作如下设计:当  $a_x > a_0$  且  $\theta > \theta_0$  时,上层协调控制器只起监控作用,SASS 和 ABS 正常单独工作;当  $a_x \leq a_0$  且  $\theta \leq \theta_0$  时,上层协调控制器发出决策指令,SASS 和 ABS 根据上层协调控制器指令工作。其中,  $a_0$  为制动减速度逻辑门限;  $\theta_0$  为车身俯仰角逻辑门限。  $a_0$ 、 $\theta_0$  的取值和符号根据具体车型及测试仪器而定,本文中的  $a_0$ 、 $\theta_0$  均小于零。协调控制器作用在悬架和制动系统执行机构上的转矩  $T_s$  和  $T_b$  计算公式如下:

$$T_s = a\Delta F_{z1} - b\Delta F_{z2} \quad (1)$$

$$T_{bi} = \Delta F_{zi}\varphi_x R_i \quad (i = 1,2) \quad (2)$$

式中,  $a$ 、 $b$  分别为前后轮到质心的距离;  $\Delta F_{zi}$  为轮胎动载荷;  $T_{bi}$  为协调控制器作用在制动执行机构上的转矩;  $R_i$  为轮胎  $i$  的滚动半径;  $\varphi_x$  为纵向附着系数;下标 1、2 分别表示前后轮。

从以上逻辑可以看出:

$$a_0 > a_x \text{ 即 } |a_0| < |a_x| \quad (3)$$

### 3 实车试验

试验场地为干燥、平坦、任意方向的坡度不大于 2% 的柏油路面;风速不大于 5m/s;大气温度 26℃。

试验仪器除了笔记本电脑、电源、车速传感器、制动踏板传感器、逆变器外,还有汽车动态信号实时分析仪(DSPS)、陀螺仪、车速传感器等。

试验车辆如图 7 所示。将自行开发的上层协调控制器、SASS 及 ABS 安装于试验车辆上。

#### 3.1 试验方法

在单独控制和协调控制的情况下,分别在车速 40km/h、60km/h、80km/h 时进行直线紧急制

动。单独控制是指上层协调控制器不工作,SASS、ABS 均按照各自的控制程序工作;协调控制是指上层协调控制器工作,SASS、ABS 控制器在上层协调控制器的指导下工作。

#### 3.2 试验结果及分析

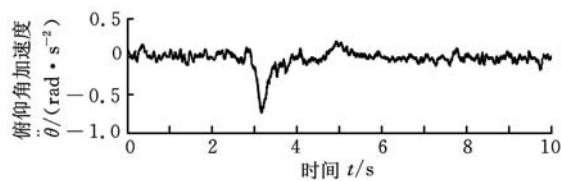
依据上述试验方法进行试验,试验结果统计情况分别见表 1 和表 2。试验数据曲线如图 8~13 所示。

表 1 不同车速、不同控制工况下的制动时间和距离

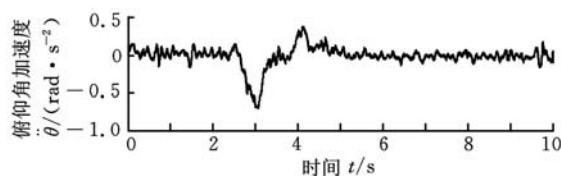
车速 (km/h)	40		60		80	
参数	制动时间 (s)	制动距离 (m)	制动时间 (s)	制动距离 (m)	制动时间 (s)	制动距离 (m)
单独控制	2.55	11.64	3.78	26.61	5.00	40.72
协调控制	2.24	10.06	3.69	25.15	4.63	39.38

表 2 不同车速、不同控制工况下俯仰角和俯仰角加速度最大值

车速 (km/h)	40		60		80	
参数	俯仰角 (°)	俯仰角加速度 (rad/s <sup>2</sup> )	俯仰角 (°)	俯仰角加速度 (rad/s <sup>2</sup> )	俯仰角 (°)	俯仰角加速度 (rad/s <sup>2</sup> )
单独控制	9.67	0.73	12.89	0.89	13.48	1.15
协调控制	6.05	0.69	8.01	0.80	10.84	1.04

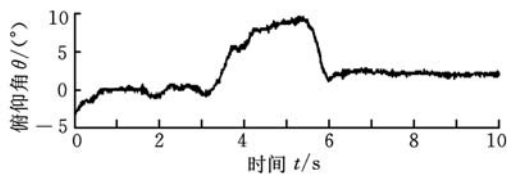


(a)单独控制

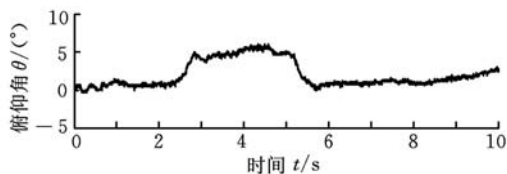


(b)协调控制

图 8 40km/h 时的俯仰角加速度

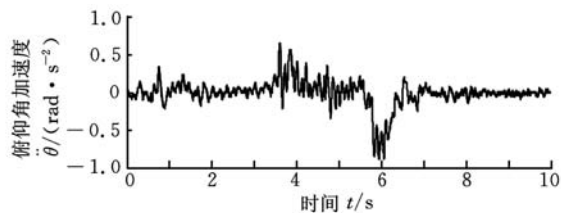


(a)单独控制

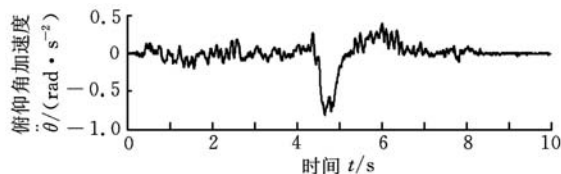


(b)协调控制

图 9 40km/h 时的俯仰角

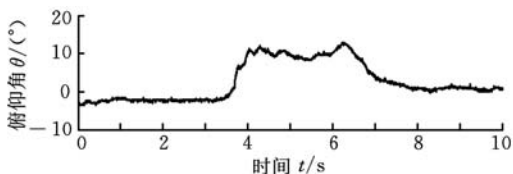


(a)单独控制

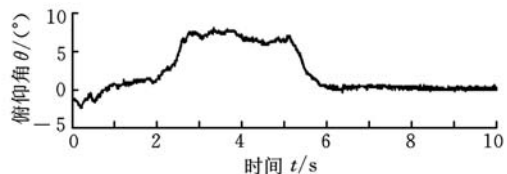


(b)协调控制

图 10 60km/h 时的俯仰角加速度



(a)单独控制

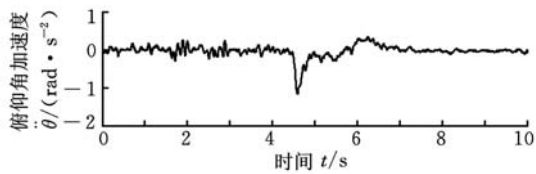


(b)协调控制

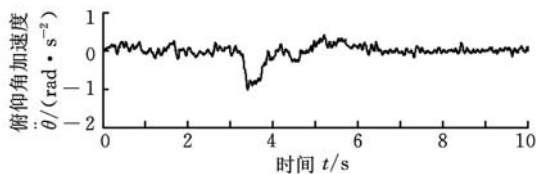
图 11 60km/h 时的俯仰角

所得试验结果列表对比分析如下:

(1)在 40km/h 时,采用协调控制时车辆的制动距离比单独控制时车辆的制动距离缩短 1.58m,制动时间也减少了 0.31s;在 60km/h 时,采用协调控制时车辆的制动距离比单独控制时车辆的制动距离缩短 1.46m,制动时间也减少了 0.09s;在 80km/h 时,采用协调控制时车辆的制动距离比单独控制时车辆的制动距离短

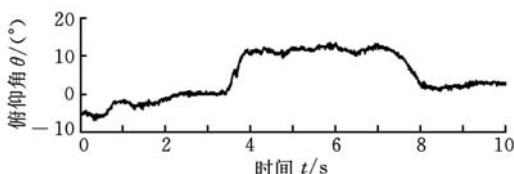


(a)单独控制

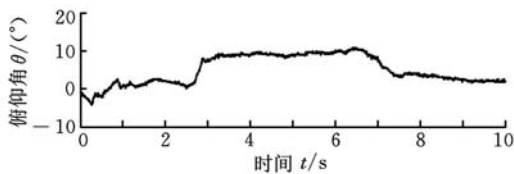


(b)协调控制

图 12 80km/h 时的俯仰角加速度



(a)单独控制



(b)协调控制

图 13 80km/h 时的俯仰角

1.34m,制动时间也减少了0.37s。

采用协调控制时,悬架所提供的轮胎附着力使在车轮制动时有较大的制动力,从而缩短了制动距离。除了在制动距离和制动时间上体现出协调控制的优越性之外,驾驶员在制动时能够明显感觉到协调控制条件下的制动比较平稳,有效提高制动能力和制动稳定性。

(2)在 40km/h 时,采用协调控制时比单独控制时车辆俯仰角的最大值减小了 3.62°,俯仰角加速度最大值减小了 0.04rad/s<sup>2</sup>;在 60km/h 时,采用协调控制时比单独控制时车辆俯仰角的最大值减小了 4.88°,俯仰角加速度最大值减小了 0.09rad/s<sup>2</sup>;在 80km/h 时,采用协调控制时比单独控制时车辆俯仰角的最大值减小了 2.64°,俯仰角加速度最大值减小了 0.11rad/s<sup>2</sup>。

采用协调控制时,3 种车速下的俯仰角和俯仰角加速度均比单独控制时候略有减小,电磁阀式半主动悬架在改善制动性能的同时也能有效地减小俯仰,改善行驶平顺性,使车辆乘坐舒适性和行驶安全性都获得很大提高。

## 4 结论

(1)上层协调控制器和底层控制器控制逻辑正确,达到了设计要求。

(2)采用分层协调控制策略,较好地解决了两子系统间的矛盾,在保证车辆制动安全性的基础上,提高了车辆稳定性和平顺性,获得了较好的控制效果。

(3)CAN 通信的成功应用为车载网络控制系统的实现奠定了基础。

(4)采用分层协调控制策略,尽可能充分利用了原有的控制模块,避免了集中控制结构的缺点,具有降级控制的功能,提高了系统的可靠性。

### 参考文献:

[1] 陈无畏,王志君,范迪彬,等. 汽车半主动悬架的神经网络自适应控制[J]. 汽车工程,1998,20(1):31-36.  
Chen Wuwei, Wang Zhijun, Fan Dibin, et al. The Adaptive Neural Network Control on Semi-active Suspension of the Vehicle[J]. Automotive Engineering,1998,20(1):31-36.

[2] 李克强,高锋,永井正夫. 基于多自由度车辆模型的主动悬架研究[J]. 中国机械工程,2003,14(14):1249-1251.  
Li Keqiang, Gao Feng, Nagai Masao. The Active Suspension Study Based on a Multi-degree-of-freedom Vehicle Model[J]. China Mechanical Engineering,2003,14(14):1249-1251.

[3] Tseng H E, Hedrick J K. Semi-active Control Laws—optimal and Sub-optimal[J]. Vehicle System Dynamics,1994,23:545-569.

[4] 王德平,郭孔辉. 车辆动力学稳定性控制的控制原理与控制策略研究[J]. 机械工程学报,2000,36(3):97-99.  
Wang Deping, Guo Konghui. Study on the Stability Control Vehicle Dynamics Control Principles and Control Strategies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2000,36(3):97-99.

[5] 晏蔚光,李果,余达太,等. 基于模糊 PID 控制的汽车防抱制动系统控制算法研究[J]. 公路交通科技,2004,21(7):123-126.  
Yan Weiguang, Li Guo, Yu Datai, et al. Study on the Control Algorithm of Automotive Anti-lock Braking System Based on Fuzzy PID[J]. Journal of

Highway and Transportation,2004,21(7):123-126.

[6] 郭孔辉,丁海涛,刘溧. 汽车 ABS 混合仿真试验台的开发与研究[J]. 中国机械工程,2000,11(12):1417-1421.  
Guo Konghui, Ding Haitao, Liu Su. The Development and Research Vehicle ABS Mixed Simulation Test Bench [J]. China Mechanical Engineering,2000,11(12):1417-1421.

[7] Trächtler A. Integrated Vehicle Dynamics Control Using Active Brake,Steering and Suspension Systems[J]. International Journal of Vehicle Design,2004,36(1):1-12.

[8] 冯金芝,喻凡,李君,等. 车辆防抱制动系统与主动悬架联合控制[J]. 农业机械学报,2002,33(2):15-19.  
Feng Jinzhi, Yu Fan, Li Jun, et al. The Joint Control on Anti-lock Braking System and Active Suspension of the Vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(2):15-19.

[9] Cherouat H, Lakehal-Ayat M, Diop S. An Integrated Braking and Steering Control for a Cornering Vehicle[C]//The 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Amhem, Netherlands, 2004:341-346.

[10] Yoshimura T, Emoto Y. Steering and Suspension System of a Full Car Model Using Fuzzy Reasoning Based on Single Input Rule Modules[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems,2003,1(2):237-255.

[11] 祝辉,陈无畏. 汽车悬架、转向和制动系统建模与相互影响分析[J]. 农业机械学报,2010,41(1):7-13.  
Zhu Hui, Chen Wuwei. The Modeling and Interaction Analysis on Suspension, Steering and Braking Systems of Vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):7-13.

(编辑 张 洋)

作者简介:夏 光,男,1983 年生。合肥工业大学汽车工程技术研究院助理研究员。研究方向为车辆底盘系统动力学与控制。发表论文 10 余篇。陈无畏,男,1951 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。唐希雯,女,1983 年生。解放军电子工程学院雷达对抗系讲师。赵林峰,男,1979 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院讲师。